

О. А. Петрова¹, Г. К. Даумова², Н. Ф. Денисова³, Г. М. Искалиева⁴, А. В. Елисеева⁵

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СНЕЖНЫХ ЛАВИН В ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается использование ГИС-технологий при исследовании лавинной активности в Восточно-Казахстанской области. Представленные в статье результаты исследования получены на первом этапе обследования территории области по различным факторам, которые могут иметь значение для уровня лавинной опасности в регионе. Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) необходимы для разработки мониторинговых систем лавинной опасности и научного обоснования размещения датчиков системы на лавиноопасных склонах. Первым шагом в проведенном исследовании является построение цифровой модели рельефа (ЦМР) с использованием данных SRTM. Далее в работе приведен обзор использованных в исследовании методов идентификации атмосферных осадков. В основе этих методов лежит использование данных оптического дистанционного зондирования, что включает в себя оценку специальных показателей и индексов. Были рассмотрены такие показатели, как индекс NDSI для оценки покрытия поверхности Земли снегом или ледниками; набор данных CHIRPS и GSMaP для оценки климатических опасностей, связанных с осадками; данные реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ECMWF для оценки климата и погоды за последние несколько десятилетий в Восточно-Казахстанской области. Кроме этого, для понимания характеристик подстилающей поверхности, влияющей на самопроизвольный сход лавин в частности, был использован индекс NDWI для оценки увлажненности исследуемой территории. По результатам исторических спутниковых данных снимков Sentinel-2 для Восточно-Казахстанской области были построены разные цифровые модели на основе вышеназванных показателей. Получившиеся модели были использованы на первом этапе оценки территории области по климатическим характеристикам для дальнейшего создания цифровых моделей более высокого разрешения по самым проблемным лавиноопасным участкам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГИС, лавины, мониторинг, климатические данные, цифровая модель рельефа

¹ Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, ул. Серикбаева, д. 19, Усть-Каменогорск, Казахстан, 070004, *e-mail*: OPetrova@edu.ektu.kz

² Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, ул. Серикбаева, д. 19, Усть-Каменогорск, Казахстан, 070004, *e-mail*: gulzhan.daumova@mail.ru

³ Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, ул. Серикбаева, д. 19, Усть-Каменогорск, Казахстан, 070004, *e-mail*: NDenisova@edu.ektu.kz

⁴ Институт ионосферы, садоводческое товарищество «Ионосфера», Каменское плато, д. 117, Алматы, Казахстан, 050020, *e-mail*: igm.ionos@gmail.com

⁵ Институт ионосферы, садоводческое товарищество «Ионосфера», Каменское плато, д. 117, Алматы, Казахстан, 050020, *e-mail*: yelisseyevaa@gmail.com

**Olga A. Petrova¹, Gulzhan K. Daumova², Natalya F. Denisova³, Gulnara M. Iskaliyeva⁴,
Alena V. Yelisseyeva⁵**

**GEOINFORMATION RESEARCH FOR MONITORING SNOW
AVALANCHES IN THE EAST KAZAKHSTAN REGION
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

ABSTRACT

The article discusses the use of GIS technologies in the study of avalanche activity in the East Kazakhstan Region. The research results presented in the article were obtained at the first stage of the survey of the territory of the region according to various factors and criteria that may be important for the level of avalanche activity in the region. Earth remote sensing (ERS) data is necessary for the development of avalanche hazard monitoring systems and scientific substantiation of the placement of sensors of the system on avalanche-prone slopes. The first step in this research is to build a digital elevation model (DEM) using SRTM data. The paper then provides an overview of the atmospheric precipitation identification methods used in the research. These methods are based on the use of optical remote sensing data, which includes the assessment of special indicators and indices. The following indicators were considered: the NDSI index for assessing the coverage of the Earth's surface with snow or glaciers; the CHIRPS and GSMaP dataset for assessing climatic hazards associated with precipitation; data from the ERA5 reanalysis of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts ECMWF to assess the climate and weather over the past few decades in the East Kazakhstan Region. In addition, to understand the characteristics of the underlying surface affecting spontaneous avalanches in particular, the NDWI index to assess the moisture content of the studied area. Based on the results of historical satellite data from Sentinel-2 images, various digital models were built for the East Kazakhstan Region based on the above-mentioned indicators. These models were used at the first stage of assessing the territory of the region by climatic characteristics to further create higher-resolution digital models for the most problematic avalanche-prone areas.

KEYWORDS: GIS, avalanches, monitoring, climate data, digital elevation model

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день большое значение имеют вопросы изменения климата и последствия этого процесса не только на глобальном, но и на региональном уровне. К ним относятся различные катаклизмы природного характера: сильные засухи и природные пожары. Противоположная ситуация — обильные осадки и наводнения, а также возрастающая с каждым годом лавинная активность. Самопроизвольный сход лавин все чаще провоцируется экстремальными погодными условиями: обильными осадками, резкими потеплениями в зимний период, сильными ветрами. Эта ситуация становится характерной для Восточно-Казахстанской области.

¹ D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 19, Serikbayeva str., Ust-Kamenogorsk, 070004, Kazakhstan, *e-mail:* OPetrova@edu.ektu.kz

² D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 19, Serikbayeva str., Ust-Kamenogorsk, 070004, Kazakhstan, *e-mail:* gulzhan.daumova@mail.ru

³ D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 19, Serikbayeva str., Ust-Kamenogorsk, 070004, Kazakhstan, *e-mail:* NDenisova@edu.ektu.kz

⁴ Ionosphere Institute, Horticultural Association “Ionosphere”, 117, Kamenskoe plat., Almaty, 050020, Kazakhstan, *e-mail:* igm.ionos@gmail.com

⁵ Ionosphere Institute, Horticultural Association “Ionosphere”, 117, Kamenskoe plat., Almaty, 050020, Kazakhstan, *e-mail:* yelisseyevaa@gmail.com

Климат Восточно-Казахстанского региона отличается разнообразием между степями, полупустынями и горными районами. В целом, резко континентальный климат области обусловлен ее расположением в центральной части Евразии. Он характеризуется значительными колебаниями температур (как сезонными, так и суточными), холодной и снежной зимой, жарким и сухим летом. Климатические особенности восточной части этой территории сформированы горными хребтами Саур-Тарбагатайским, Калбинским и Алтайскими гор с вечными ледниками на горных массивах. Зимы в области холодные и продолжительные, минимумы температур достигают $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$. Распределение годового количества атмосферных осадков по области очень неравномерно; наибольшее количество выпадает в горных и предгорных районах.

Площадь Восточно-Казахстанской области после отделения области Абай в 2022 г. составляет $97\,800\text{ км}^2$. В горных районах Восточного Казахстана живет и работает большое количество людей, имеется туристическая инфраструктура, разветвленная сеть автодорог. Все это находится в зонах влияния лавиноопасных участков. В связи с этим важным шагом для области является разработка мониторинговой системы лавинной опасности. Такая система будет представлять собой программно-аппаратный комплекс для анализа лавинной обстановки и передачи соответствующих оповещений, в первую очередь службам Департамента по чрезвычайным ситуациям, которые обеспечивают профилактические мероприятия по лавинной безопасности. Стратегия создания этой системы включает сбор различных исторических, архивных и текущих данных о метеорологических параметрах, состоянии и морфологии склонов, включая данные ДЗЗ и создание цифровых двойников, данные о самопроизвольных сходах лавин и обработку их методами прямого и обратного моделирования и машинного обучения.

Первичное исследование территории может проводиться с использованием методов ДЗЗ. В первую очередь необходимо построение цифровых моделей рельефа изучаемой местности. На первом этапе разработки системы мониторинга были проанализированы данные ДЗЗ по различным показателям за последние 4 года и созданы цифровые модели рельефа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методология проведения работы основывается на подходах геоинформационного картографирования с учетом современных тенденций использования аэрокосмической информации.

В мониторинге лавин и лавиноопасных участков цифровые модели рельефа необходимы для сбора информации о рельефе, топографии и других факторах, которые помогают в предотвращении лавин и управлении лавинными рисками. Для этого использовались два варианта цифровых моделей.

DEM — широко используется в мониторинге лавин и лавиноопасных участков благодаря своей способности предоставлять детальную информацию о рельефе и топографии района [Polidori, ElHage, 2020; Baghsorkhi, 2022].

Способы использования DEM в мониторинге лавин нацелены на определение нескольких значимых для возникновения лавиноопасной обстановки показателей:

- определение уклона: вычислить уклон поверхности; это позволяет идентифицировать крутые склоны, которые могут быть подвержены образованию и спуску лавин;
- определение высоты снежного покрова: оценка толщины снежного покрова, что является важным фактором для определения потенциальной лавиноопасности;
- идентификация зон транзита лавин: идентифицирование типичных путей лавин и определение точки потенциальной их инициации;

- моделирование лавин: создание моделей схода лавин, что позволяет оценить потенциальные масштабы и последствия лавинных событий;
- планирование мер безопасности: выявление критических участков и разработка мер безопасности, таких как установка заграждений или датчиков.

Для эффективной работы с цифровыми моделями рельефа в исследовании также была использована SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission). Данная миссия была проведена в феврале 2000 г. с использованием радарной интерферометрической камеры и радиолокационных сенсоров SIR-C и X-SAR, установленных на борту космического корабля многократного использования Shuttle [Caiserman, 2022]. В 2014 г. цифровая модель рельефа SRTM была улучшена. Основная цель улучшений заключалась в заполнении пробелов в данных, характерных для территорий со сложным рельефом, водных объектов и других местностей, что плохо поддаются радарной съемке, в т. ч. снежный покров и ледники.

Надежное и точное измерение количества осадков имеет решающее значение для метеорологов и сотрудников служб Департамента по чрезвычайным ситуациям при мониторинге лавиноопасных ситуаций. Такая оценка может осуществляться при помощи методов анализа снежного покрова территории с использованием данных оптического дистанционного зондирования. Метод включает использование специальных индексов, пороговую сегментацию каналов и классификацию изображений. Одним из таких индексов является индекс NDSI.

NDSI (Normalized Difference Snow Index) — это индекс, используемый для оценки покрытия снегом или ледниками какой-либо территории. Он определяет разницу между инфракрасным и видимым каналами, что помогает выявлять наличие снега на земной поверхности [Mityok, 2018; Tong, 2020].

NDSI позволяет распознать снежный покров на основе его отражательных свойств. Группа ученых исследовала чувствительность порогов NDSI при картировании снежного покрова и продемонстрировала его высокую точность при анализе снежного покрова территории [Tong, 2020].

В исследовании по мониторингу лавин индекс NDSI может быть использован для оценки вероятности возникновения лавиноопасных ситуаций. Анализ изменения значения NDSI с течением времени поможет в идентификации снежного покрова в различных районах. Это важная информация для предсказания потенциальных лавиноопасных зон и определения их степени лавинной опасности. Таким образом, использование NDSI в мониторинге лавин позволяет значительно улучшить контроль и прогнозирование лавинной активности.

Данные CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station) и GSMaP (Global Satellite Mapping of Precipitation) — это набор инфракрасных данных климатических опасностей, связанных с осадками. Они представляют собой набор данных об осадках, основанный на данных радара с синтезированной апертурой и данных измерений наземных станций.

Набор данных CHIRPS основан на подходах к «умным» методам интерполяции и оценкам рекордных осадков с высоким разрешением и длительным периодом на основе инфракрасных наблюдений [Funk, 2015]. В CHIRPS доступны ежемесячные данные станций объединяются с ежемесячными оценками количества осадков на основе ДЗЗ, обеспечивают высокое пространственное и временное разрешение. Объединяются данные за последние три десятилетия, что дает беспрецедентную возможность исследовать долгосрочные модели осадков для маломасштабных исследований [Liu, 2019].

Оценки осадков с помощью реанализа широко используются в областях метеорологии, поскольку они могут обеспечить физические, пространственные и временные последовательные длинные временные ряды в глобальном масштабе. Европейским центром

среднесрочного прогноза погоды (ECMWF) выпущено несколько продуктов реанализа [Vernay, 2022], за которыми последовало пятое поколение — ERA5 [Hersbachetal, 2020]. Прогноз осадков в ERA5 основан на сборе данных по осадкам за последние 10–15 лет из открытых источников: Температура: ERA5 / Модель ветра: ERA5.

Индекс NDWI (Normalized Difference Water Index) — это нормализованный разностный водный индекс, который используется для выявления водных объектов на спутниковых или аэрокосмических изображениях. Получение значений индекса основано на разнице в поглощении света в ближнем инфракрасном и видимом зеленом спектрах. Индекс используется для определения наличия орошаемых пахотных земель, наводнений или постоянных поверхностных вод [Korzeniowska, 2017]. В мониторинге лавин он может быть определяющим при характеристике подстилающей поверхности и ее водонасыщения.

Таким образом, в настоящей работе использованы современные модели картографирования для количественной и качественной оценки метеорологических параметров, значимых для исследования лавинной активности в Восточно-Казахстанской области.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение спутниковых данных для Восточно-Казахстанской области было нацелено на анализ условий, в которых формируется лавинная активность в регионе. Для характеристики территории области была создана цифровая модель рельефа (рис. 1). Для дальнейшего мониторинга лавиноопасных зон исследуемой территории, был подготовлен слой цифровой модели рельефа по данным снимков Sentinel-2 (рис. 2).

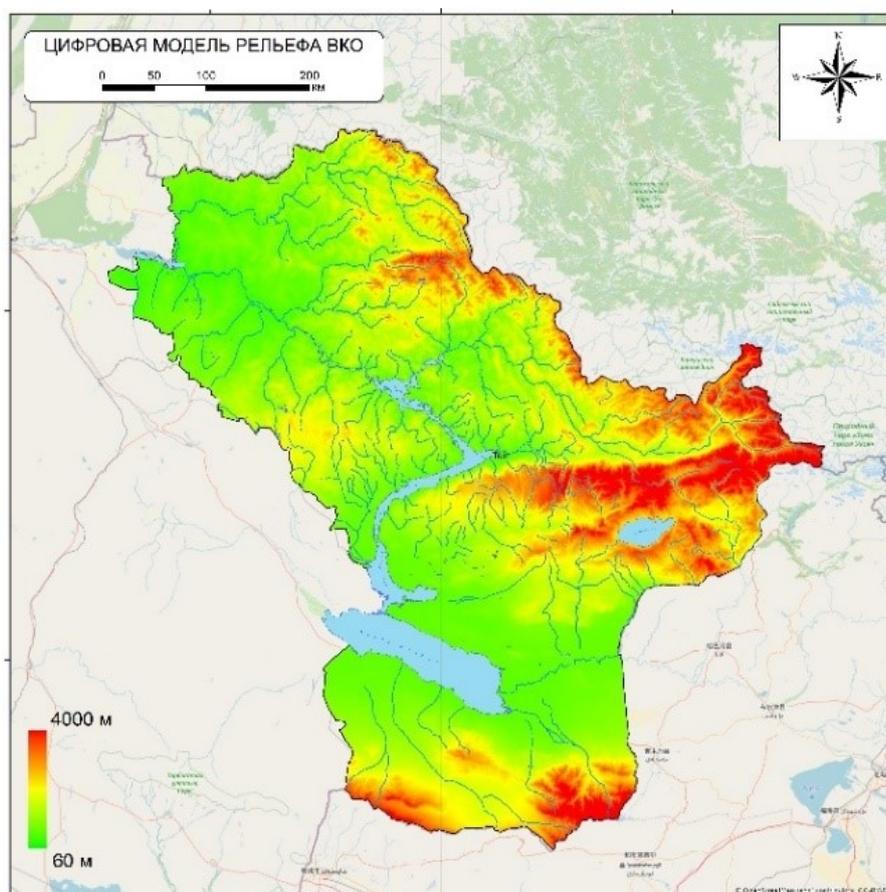


Рис. 1. Цифровая модель рельефа исследуемой территории
Fig. 1. Digital elevation model of the study area

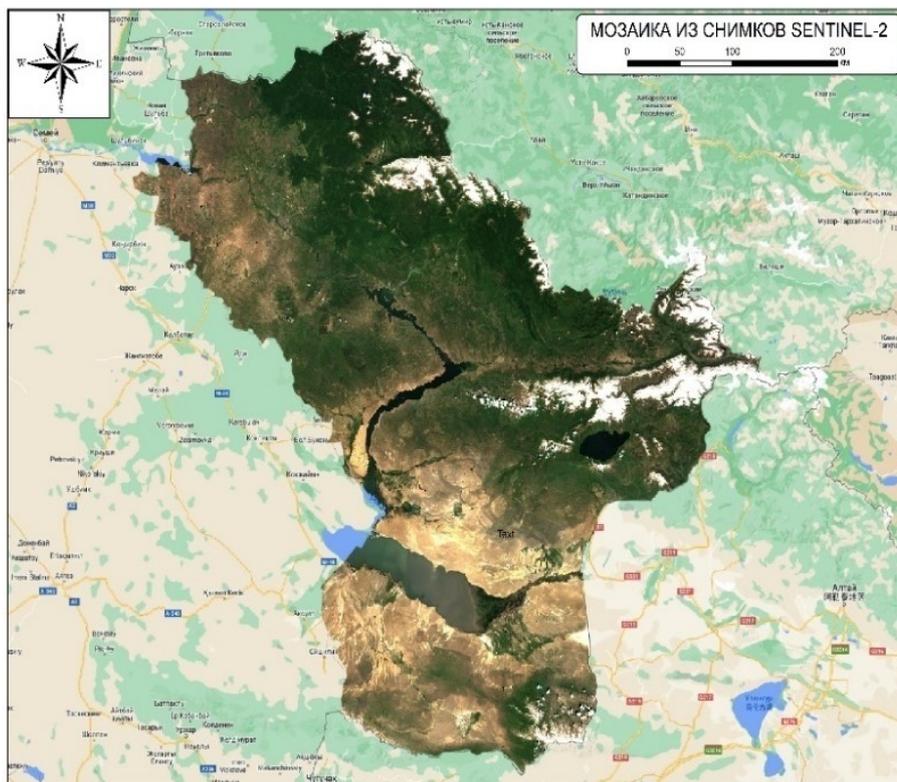


Рис. 2. Цифровая модель рельефа по данным снимков Sentinel-2
Fig. 2. Digital elevation model based on Sentinel-2 images

На рис. 3 представлен индекс снежного покрова NDSI на исследуемую территорию. Из представленного материала легко определяются области в горных районах с наибольшим количеством осадков. Дополняется эта информация сведениями об осадках по данным *Precipitation GSMaP* (рис. 4). Эти данные дают оценку количества осадков в регионе, при недостатке наземных станций, предоставляют более полную картину с более высокой точностью.

На рис. 4 оценивается количество осадков в регионе в мм/час. Такое распределение осадков характерно для диапазона степного или полупустынного климата. Северо-восточные территории в горной местности, как видно на рис. 4, получают больше осадков, чем центральные и северо-западные районы, что будет характеризовать их как более лавиноподобные районы.

Идентификация и установка причин, отражающих наличие влияния ветра на риски возникновения ЧС на территории области, оценивалась с помощью ветровой модели ERA5. Ветровая модель ERA5 показывает участок в области на стыке переменных ветровых условий, от умеренных до сильных ветров (рис. 5).

Индекс NDWI (рис. 6) указывает на участки, выделенные зеленым цветом, как на наиболее увлажненные территории области. В данной местности имеются условия с отсутствием поверхностных участков естественного дренажа. Эти районы имеют, с одной стороны, более плотную растительность, которая является снегоудерживающим фактором на склонах. С другой — они более насыщены влагой, что дополнительно определяет неустойчивость подстилающей поверхности на данных участках. Данные получены путем обработки цветных каналов снимков ближнего инфракрасного диапазона и последующих инфракрасных диапазонов волн примерно 1,24 мкм. Значение индекса варьируется от $-1,0$ до $1,0$, он получен из композитов поверхностного отражения MODIS/006/MYD09GA.

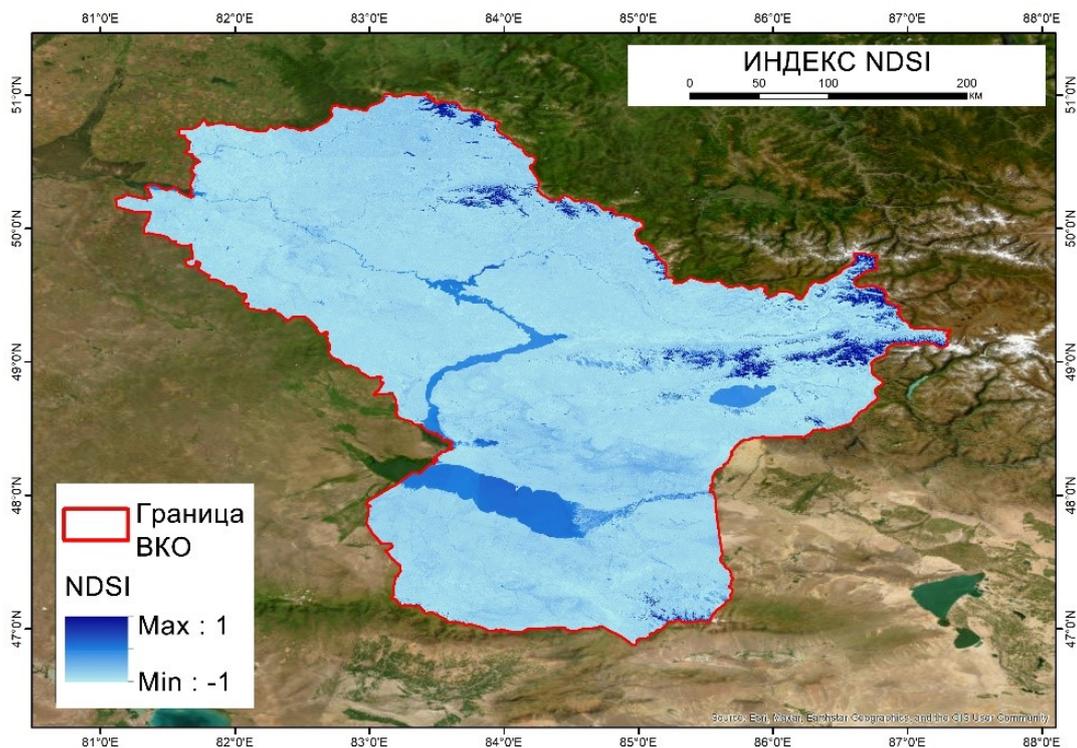


Рис. 3. Индекс NDSI, рассчитанный по мозаике из снимков Sentinel-2
Fig. 3. NDSI index, calculated from a mosaic of Sentinel-2 images

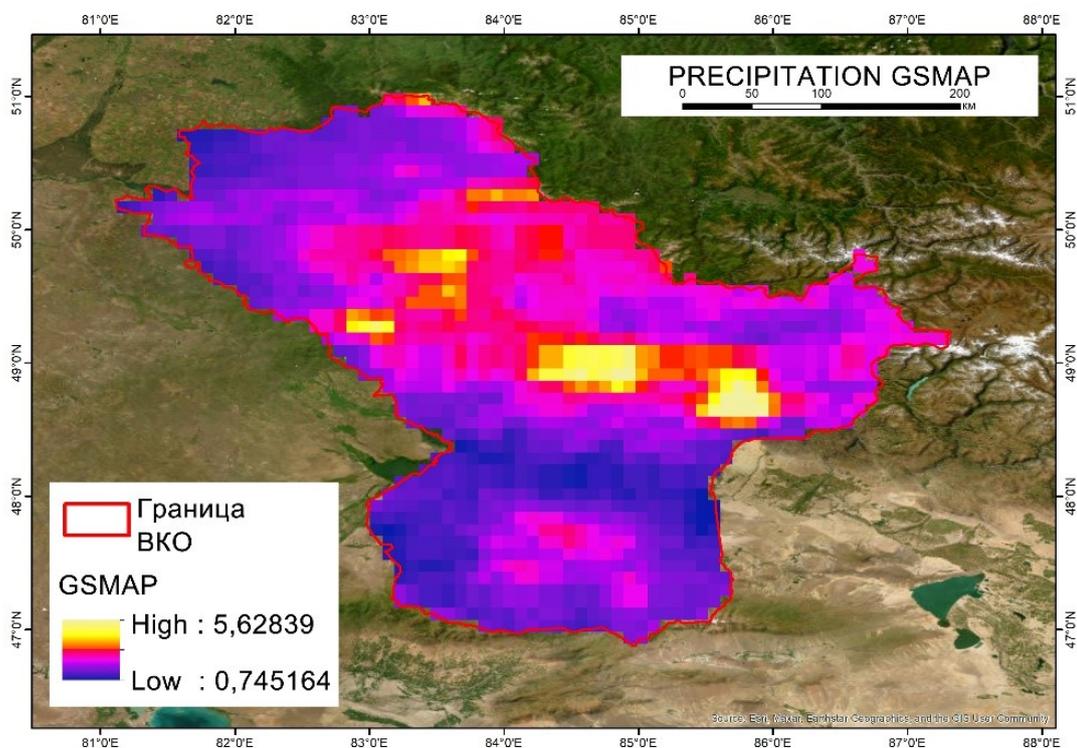


Рис. 4. Данные об осадках GSMaP по Восточно-Казахстанской области
Fig. 4. GSMaP precipitation data for the East Kazakhstan Region

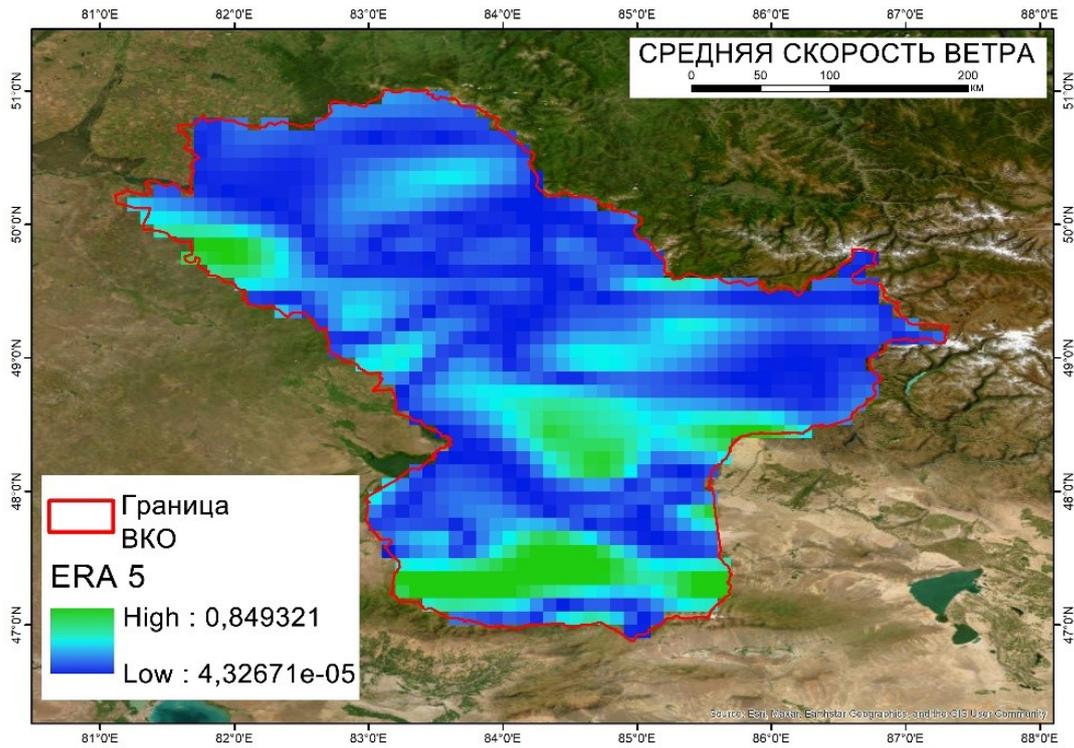


Рис. 5. Визуализация модели ERA5 по скорости ветра
Fig. 5. Visualization of the ERA 5 wind speed model

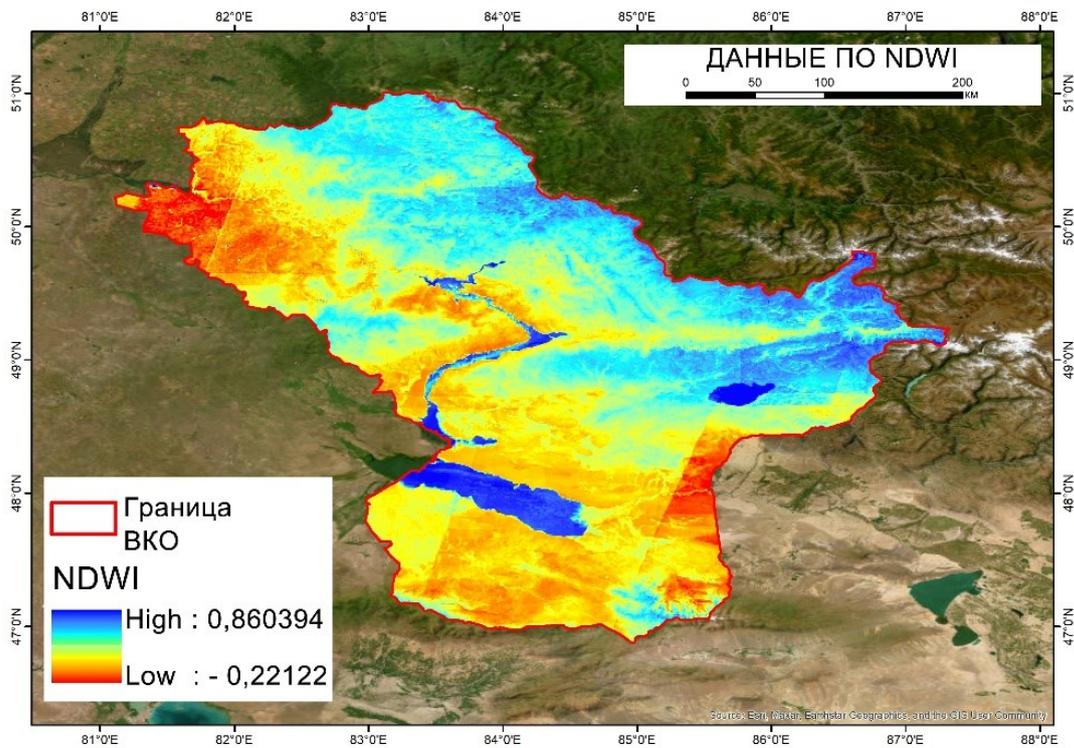


Рис. 6. Данные по NDWI для Восточно-Казахстанской области
Fig. 6. NDWI data for the East Kazakhstan Region

В ходе первичного исследования области рассматривались и другие статистические данные. По сведениям Казгидромета, средняя годовая температура воздуха по области за последние 40 лет увеличилась в среднем на 1,03 °С, при этом средние годовые значения для 2020 г. являются самыми высокими за всю историю наблюдений, а колебания могут достигать 4 °С в течение 3–4 лет. Те же тенденции отмечаются и по количеству осадков: за последние годы количество осадков на востоке Казахстана выше среднегодовой нормы в 1,3–1,8 раза. Среднегодовая скорость ветра немного уменьшается со временем. За последние 40 лет средняя скорость ветра снизилась с 10 м/с до 8,75 м/с. Экстремумы скорости ветра также уменьшаются по степени выраженности. Но ветровой фактор также остается важным для дальнейших изысканий, т. к. ветровые наносы на склонах являются одним из факторов, провоцирующих сход лавин. Сопоставление статистических данных с данными ДЗЗ дает лучшее понимание природно-климатических условий области для планирования дальнейших исследований.

ВЫВОДЫ

Построение цифровых моделей на первом этапе исследования лавинной активности Восточно-Казахстанской области помогло сформировать представление (обобщенное данными о подстилающей поверхности и, вдобавок, метеорологическими) о рельефе местности, как о земной поверхности, рассматриваемой с точки зрения ее взаимодействия со снежным покровом, а также характера растительности и увлажненности почв, характеризующих устойчивость склонов. Выявленные по статистическим данным температурные тенденции, наряду с характеристикой количества осадков и ветровым режимом в горных районах, являются одним из основных климатических факторов, влияющих на лавинную активность в горных районах области. Полученные данные помогли выполнить анализ условий, в которых формируется лавинная активность в регионе. Представленные результаты будут использованы на следующем этапе исследований для создания цифровых моделей рельефа более высокого разрешения, а также для выбора мест сбора данных наземными станциями.

БЛАГОДАРНОСТИ

В материалах статьи представлены результаты научных исследований, полученные в ходе реализации научно-технической программы BR21882022 на тему: «Исследование лавинной активности в Восточно-Казахстанской области для разработки систем мониторинга и научного обоснования их размещения» в рамках программно-целевого финансирования.

ACKNOWLEDGEMENTS

The article presents the results of scientific research obtained during the implementation of a scientific and technical program BR21882022 on the topic: “Research of avalanche activity in the East Kazakhstan Region for development of monitoring systems and scientific substantiation of their placement” within the framework of program-targeted financing.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Baghsorkhi A. R., Motamedvaziri B., Samani A. N., Ahmadi H., Moeini A. Snow avalanche risk management in Shemshak region: A modelling, mapping and evaluation of factors affecting the occurrence of snow avalanches. *Current Science*, 2022. V. 122. No. 6. P. 717–734. DOI: 10.18520/cs/v122/i6/717-734.

Caiserman A., Sidle R. C., Gurung D. R. Snow Avalanche Frequency Estimation: 32 years of remote hazard 2 monitoring in Afghanistan. *The Cryosphere*, 2022. V. 16. P. 3295–3312. DOI: 10.5194/tc-16-3295-2022.

Funk C., Peterson P., Landsfeld M. The climate hazards infrared precipitation with stations — a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2015. V. 2. 150066. DOI: 10.1038/sdata.2015.66.

Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R. J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J. N. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020. V. 146. No. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

Korzeniowska K., Bühler Y., Marty M., Korup O. Regional snow-avalanche detection using object-based image analysis of near-infrared aerial imagery. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2017. V. 17. P. 1823–1836. DOI: 10.5194/nhess-17-1823-2017.

Liu J., Shangguan D., Liu S., Ding Y., Wang S., Wang X. Evaluation and comparison of CHIRPS and MSWEP daily-precipitation products in the Qinghai-Tibet Plateau during the period of 1981–2015. *Atmospheric Research*, 2019. V. 230. 104634. DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.104634.

Mityok Z. K., Bolton D. K., Coops N. C., Berman E. E., Senger S. Snow cover mapped daily at 30 m resolution using a fusion of multi-temporal MODIS NDSI data and Landsat surface reflectance. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2018. V. 44. No. 5. P. 413–434. DOI: 10.1080/07038992.2018.1538775.

Polidori L., El Hage M. Digital Elevation Model Quality Assessment Methods: A Critical Review. *Remote Sensing*, 2020. V. 12. No. 21. 3522. DOI: 10.3390/rs12213522.

Tong R., Parajka J., Komma J., Blöschl G. Mapping snow cover from daily Collection 6 MODIS products over Austria. *Journal of Hydrology*, 2020. V. 590. 125548. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125548.

Vernay M., Lafaysse M., Monteiro D., Hagenmuller P., Nheili R., Samacoïts R., Verfaillie D., Morin S. The S2M meteorological and snow cover reanalysis over the French mountainous areas: description and evaluation (1958–2021). *Earth System Science Data Discussions*, 2022. V. 14. P. 1707–1733. DOI: 10.5194/essd-14-1707-2022.

REFERENCES

Baghsorkhi A. R., Motamedvaziri B., Samani A. N., Ahmadi H., Moeini A. Snow avalanche risk management in Shemshak region: a modelling, mapping and evaluation of factors affecting the occurrence of snow avalanches. *Current Science*, 2022. V. 122. No. 6. P. 717–734. DOI:10.18520/cs/v122/i6/717-734.

Caiserman A., Sidle R. C., Gurung D. R. Snow Avalanche Frequency Estimation: 32 years of remote hazard 2 monitoring in Afghanistan. *The Cryosphere*, 2022. V. 16. P. 3295–3312. DOI: 10.5194/tc-16-3295-2022.

Funk C., Peterson P., Landsfeld M. The climate hazards infrared precipitation with stations — a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2015. V. 2. 150066. DOI: 10.1038/sdata.2015.66.

- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R. J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J. N.* The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020. V. 146. No. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
- Korzeniowska K., Bühler Y., Marty M., Korup O.* Regional snow-avalanche detection using object-based image analysis of near-infrared aerial imagery. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2017. V. 17. P. 1823–1836. DOI: 10.5194/nhess-17-1823-2017.
- Liu J., Shangguan D., Liu S., Ding Y., Wang S., Wang X.* Evaluation and comparison of CHIRPS and MSWEP daily-precipitation products in the Qinghai-Tibet Plateau during the period of 1981–2015. *Atmospheric Research*, 2019. V. 230. 104634. DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.104634.
- Mityok Z. K., Bolton D. K., Coops N. C., Berman E. E., Senger S.* Snow cover mapped daily at 30 m resolution using a fusion of multi-temporal MODIS NDSI data and Landsat surface reflectance. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2018. V. 44. No. 5. P. 413–434. DOI: 10.1080/07038992.2018.1538775.
- Polidori L., El Hage M.* Digital Elevation Model Quality Assessment Methods: A Critical Review. *Remote Sensing*, 2020. V. 12. No. 21. 3522. DOI: 10.3390/rs12213522.
- Tong R., Parajka J., Komma J., Blöschl G.* Mapping snow cover from daily Collection 6 MODIS products over Austria. *Journal of Hydrology*, 2020. V. 590. 125548. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125548.
- Vernay M., Lafaysse M., Monteiro D., Hagenmuller P., Nheili R., Samacoïts R., Verfaillie D., Morin S.* The S2M meteorological and snow cover reanalysis over the French mountainous areas: description and evaluation (1958–2021). *Earth System Science Data Discussions*, 2022. V. 14. P. 1707–1733. DOI: 10.5194/essd-14-1707-2022.
-